

ÍNDICE

Prefacio	19
Organización de la Unidad Didáctica	23
Cómo utilizar el libro	25
Objetivos docentes	25
1. Introducción al modelado y la simulación	29
1.1. Introducción	33
1.2. Conceptos fundamentales	34
1.2.1. Sistema, experimento y modelo	34
1.2.2. Niveles en el conocimiento de los sistemas	36
1.2.3. Marco formal para el modelado y la simulación	38
1.3. Pasos en un estudio de simulación	41
1.3.1. Definición del objetivo	41
1.3.2. Hipótesis de modelado	41
1.3.3. Planteamiento del modelo	44
1.3.4. Diseño de los experimentos	46
1.3.5. Verificación y validación	46
1.4. Tipos de modelos y sus simuladores	47
1.4.1. Clasificaciones de los modelos matemáticos	47
1.4.2. Modelos de tiempo discreto	52
1.4.3. Modelos de eventos discretos	53

1.4.4.	Autómatas celulares	57
1.4.5.	Modelos basados en agentes	64
1.4.6.	Modelos dinámicos en ecuaciones diferenciales ordinarias	68
1.4.7.	Modelos híbridos	74
1.4.8.	Modelos en derivadas parciales	77
1.5.	Introducción al análisis de datos con R	84
1.5.1.	El espacio de trabajo	87
1.5.2.	Estructuras de datos	88
1.5.3.	Gráficos	91
1.5.4.	Manejo básico de los datos	95
1.5.5.	Valor NA (Not Available)	97
1.5.6.	Conversión del tipo de datos	98
1.5.7.	Control del flujo	99
1.5.8.	Funciones matemáticas y estadísticas	100
1.5.9.	Definición de funciones	103
1.5.10.	Paquetes	103
1.6.	Lecturas recomendadas	104
1.7.	Ejercicios de autocomprobación	106
1.8.	Soluciones de los ejercicios	116
2.	Modelado basado en principios físicos	137
2.1.	Introducción	141
2.2.	El lenguaje Modelica	142
2.2.1.	Paradigma del modelado físico	142
2.2.2.	Orientación a objetos	145
2.2.3.	Entornos de modelado	147
2.3.	Fundamentos del modelado de sistemas físicos	168
2.3.1.	Interacción entre los componentes	168

2.3.2.	Condiciones de contorno	170
2.3.3.	Disipación de la energía	171
2.3.4.	Intercambio de calor	172
2.3.5.	Almacenamiento de la energía	172
2.3.6.	Conversión reversible de la energía	174
2.4.	Circuitos eléctricos	176
2.4.1.	Ejemplo 1: circuito rectificador	176
2.4.2.	Ejemplo 2: librería eléctrica	187
2.4.3.	Ejemplo 3: redeclaración del tipo de los componentes	199
2.5.	Sistemas mecánicos	202
2.5.1.	Ejemplo 1: traslación en una dirección	204
2.5.2.	Ejemplo 2: traslación en el plano	210
2.5.3.	Ejemplo 3: vibración longitudinal de una varilla	218
2.6.	Flujo de fluidos e intercambio de calor	222
2.6.1.	Ejemplo 1: flujo radial de calor en una tubería	223
2.6.2.	Ejemplo 2: conducción longitudinal del calor en una varilla	232
2.6.3.	Ejemplo 3: control del nivel y temperatura de un depósito	238
2.6.4.	Ejemplo 4: disipación del calor de un circuito	252
2.7.	Lecturas recomendadas	259
2.8.	Ejercicios de autocomprobación	260
2.9.	Soluciones de los ejercicios	266
3.	Simulación de modelos de tiempo continuo	285
3.1.	Introducción	289
3.2.	Asignación de la causalidad computacional	291
3.2.1.	Clasificación de las variables	291
3.2.2.	Singularidad estructural	294
3.2.3.	Algoritmo de partición	296

3.2.4.	Sistemas sobredeterminados e infradeterminados	298
3.2.5.	Ejemplo: simulación de un circuito eléctrico	300
3.3.	Sistemas DAE estructuralmente singulares	308
3.4.	Índice de los sistemas DAE	318
3.4.1.	Definición de índice	318
3.4.2.	Dificultades asociadas al índice superior	327
3.5.	Inicialización de sistemas DAE	329
3.5.1.	Ligaduras ocultas y reducción del índice	331
3.5.2.	El algoritmo de Pantelides	337
3.6.	Lazos algebraicos	341
3.6.1.	Manipulación simbólica de los lazos algebraicos	342
3.6.2.	Solución de los lazos en la inicialización	343
3.6.3.	Tearing de los lazos algebraicos no lineales	345
3.7.	Selección de las variables de estado	346
3.7.1.	Manipulación del sistema DAE	346
3.7.2.	Selección dinámica por el entorno de modelado	351
3.7.3.	Selección por el desarrollador del modelo	359
3.8.	Solución numérica de sistemas DAE	360
3.8.1.	DASSL	361
3.8.2.	Integración inline	362
3.8.3.	Integración mixed-mode	363
3.9.	Lecturas recomendadas	364
3.10.	Ejercicios de autocomprobación	365
3.11.	Soluciones de los ejercicios	376
4.	Modelado y simulación de sistemas híbridos	409
4.1.	Introducción	413
4.2.	Especificación de los modelos híbridos	413

4.2.1.	Formalismo OHM	413
4.2.2.	Especificación formal y algoritmo de la simulación	416
4.2.3.	Especificación formal y descripción en Modelica	417
4.2.4.	Ejemplo 1: rebote de una pelota	419
4.2.5.	Ejemplo 2: depósito con válvula de desagüe	422
4.2.6.	Ejemplo 3: dos depósitos conectados mediante una válvula . . .	425
4.3.	Detección y ejecución de los eventos	429
4.3.1.	Eventos simultáneos	430
4.3.2.	Función de cruce	436
4.3.3.	Determinación del instante de disparo de los eventos	441
4.3.4.	Chattering	445
4.4.	Modelos con estructura variable	449
4.4.1.	Ejemplo 1: interruptor ideal de flujo	449
4.4.2.	Ejemplo 2: tubería con sistema de desagüe	450
4.4.3.	Ejemplo 3: desagüe del líquido de un depósito	453
4.4.4.	Ejemplo 4: llenado de dos depósitos en paralelo	456
4.4.5.	Ejemplo 5: interruptor no ideal de flujo	456
4.5.	Modelado de sistemas híbridos en Modelica	459
4.5.1.	Sentencia y cláusula if	460
4.5.2.	Ejemplo 1: interruptor ideal eléctrico	461
4.5.3.	Ejemplo 2: diodo ideal	461
4.5.4.	Cláusula when	467
4.5.5.	Ejemplo 3: dos depósitos conectados mediante una válvula . .	472
4.5.6.	Ejemplo 4: rebote de una pelota	475
4.5.7.	Ejemplo 5: fricción seca	478
4.5.8.	Tratamiento literal de las expresiones if	485
4.5.9.	Ejemplo 6: conducción de calor en una pared	487

4.6.	Inicialización del modelo en Modelica	495
4.6.1.	Planteamiento de la inicialización	495
4.6.2.	Variables de tiempo continuo	496
4.6.3.	Ejemplo 1: péndulo plano	498
4.6.4.	Variables de tiempo discreto	500
4.6.5.	Ejemplo 2: lazo de control	501
4.6.6.	Modelo para la inicialización	506
4.7.	Experimentación con modelos en Modelica	506
4.7.1.	Operaciones básicas	507
4.7.2.	Experimentos complejos	509
4.8.	Rand Model Designer	512
4.8.1.	Modelado de sistemas físicos	513
4.8.2.	Ejemplo 1: diodo ideal	518
4.8.3.	Desarrollo de simulaciones interactivas	520
4.8.4.	Descripción de la vista del laboratorio virtual	523
4.8.5.	Ejemplo 2: sistema de cuatro tanques	524
4.9.	Lecturas recomendadas	530
4.10.	Ejercicios de autocomprobación	532
4.11.	Soluciones de los ejercicios	538
5.	Modelos en derivadas parciales	555
5.1.	Introducción	559
5.2.	Operadores diferenciales	559
5.2.1.	Gradiente	560
5.2.2.	Divergencia	561
5.2.3.	Rotacional	562
5.2.4.	Laplaciano	563
5.3.	Tipos de PDE lineales de segundo orden	563

5.4. Condiciones iniciales y de frontera	564
5.5. Métodos de resolución	566
5.5.1. Método de diferencias finitas	567
5.5.2. Método de elementos finitos	570
5.6. Entornos de simulación de PDE	579
5.7. FlexPDE	580
5.7.1. Ficheros de trabajo	581
5.7.2. Fichero con extensión .PDE	582
5.7.3. Geometría	582
5.7.4. Variables y ecuaciones	585
5.7.5. Dominio del problema: regiones y parámetros	587
5.7.6. Especificación de las condiciones de contorno	590
5.7.7. Control de la precisión de la solución	591
5.7.8. Salida gráfica	591
5.7.9. Problemas en una dimensión	591
5.8. Ecuación de transferencia de calor	593
5.8.1. Ejemplo 1: transmisión de calor en una varilla rectangular	597
5.8.2. Ejemplo 2: transmisión de calor en una superficie cuadrada	599
5.9. Ecuación de ondas	601
5.9.1. Ejemplo 1: cuerda fija en sus dos extremos	603
5.9.2. Ejemplo 2: cuerda fija sólo en un extremo	605
5.10. Ecuación de Laplace	606
5.10.1. Ejemplo 1: condensador 2D relleno con 2 dieléctricos	608
5.10.2. Ejemplo 2: cable coaxial de sección exterior rectangular	611
5.11. Lecturas recomendadas	614
5.12. Ejercicios de autocomprobación	615
5.13. Soluciones de los ejercicios	620

Índice alfabético	639
Bibliografía	649